

DESCRIPCIÓN DE VERTEDEROS SELLADOS DE LA COMUNIDAD DE MADRID

Jesús Pastor¹ y Ana Jesús Hernández²

¹ Dpto. de Ecología de Sistemas, IRN, CCMA, CSIC, Madrid.

² Dpto. de Ecología, Universidad de Alcalá (Madrid).

Introducción

El sellado de los vertederos de residuos sólidos urbanos (VRSU) tiene como objetivo principal preparar el área que ocupan para la restauración del impacto ambiental que producen, tendiendo a integrar el área de vertido en el medio que le rodea y sin deterioro de las condiciones medioambientales del lugar. Sin embargo, la mayor parte de los mismos tiene una deficiente integración con el entorno donde se ubican. Y así presentan, en general, un importante impacto visual negativo, tanto por su visibilidad desde las carreteras, como por su morfología (taludes con pendientes muy acusadas, y en sus primeros años, casi desprovistos de vegetación).

La mayor parte de los vertederos sellados que hemos estudiado contienen residuos de origen mixto (urbanos, industriales e inertes), que hacen aún más dificultosa la colonización natural de estos medios. Además, el más importante de los impactos producidos está vinculado a la contaminación causada por el efecto de los lixiviados tanto superficiales como profundos producidos por la infiltración del agua de lluvia y la escorrentía superficial y que afecta especialmente a los ecosistemas ubicados en las principales áreas de descarga de los lixiviados, es decir al pie de los taludes de los vertederos en las que se encuentran zonas húmedas pastoreadas por animales domésticos y fauna silvestre, cultivos variados, bastantes de los cuales están dedicados a especies, que hemos podido comprobar que acumulan metales pesados (datos aún no publicados), a otros ecosistemas del entorno, pero en muchos casos a arroyos que sirven de vehículos para la exportación de los contaminantes al exterior.

Por todo ello, estos vertederos (que son un nuevo tipo de ecosistemas en donde coinciden la sucesión primaria con la secundaria), tienen un gran interés para la aplicación de la ciencia ecológica, ya que proporcionan un escenario real, adecuado para la investigación acerca de las pautas que podemos seguir tanto para la restauración de los ecosistemas degradados y contaminados, como para el conocimiento de especies vege-

tales indicadoras de los variados tipos de contaminación que existen en ellos, y de otras especies que pueden ser idóneas para la revegetación (colonización espontánea de la vegetación procedente del banco de semillas del material edáfico de cobertura), la fitorrestauración, a base de especies que puedan adaptarse a las condiciones de cada uno de ellos y finalmente la fitorremediación (acumulación sobresaliente de cantidades importantes de contaminantes en raíces y partes aéreas).

Por ello exponemos a continuación aquellas variadas características que permitan tener un perfil real de estos ecosistemas emergentes.

Vertederos estudiados y métodos de estudio

Aunque se han estudiado muchos vertederos, que incidentalmente pueden aparecer en el relato, se han priorizado especialmente para este capítulo 18 VRSU pertenecientes a la Comunidad de Madrid, agrupados sobre la base de las diferentes litologías de los substratos en las que se ubican: tres sobre granitos y gneis (en adelante los denominaremos vertederos graníticos, situados en los términos municipales de El Escorial, San Lorenzo del Escorial y Colmenar Viejo); cuatro sobre substratos arcósicos —facies Madrid— (denominados en adelante vertederos arcósicos, que se encuentran en Navalcarnero, Villaviciosa de Odón, Móstoles y El Álamo); otros siete se hallan sobre substratos de calizas y margas (en adelante vertederos calizo-margosos, correspondientes a Arganda, Mejorada del Campo, La Poveda, otros tres en el municipio de Pinto y en Getafe). Finalmente uno localizado sobre yesos (vertedero de Aranjuez).

Todos los vertederos fueron sellados por vez primera entre los años 1982 y 1989 y presentan como ya hemos visto, por lo general, uno o varios taludes con fuertes pendientes (siempre mayores del 30%). Su superficie varía, entre 50.000 y 70.000 m² generalmente, y se pueden calificar de incontrolados, respecto a sus características de explotación y sellado, puesto que no se ejerció ningún tipo de control para dirigir la salida de lixiviados procedentes del vertedero fuera del área de vertido.

El material de la cubierta consistió en una capa de unos 20-50 cm de espesor de tierras y escombros del entorno, que no contribuyeron a su impermeabilización frente a las aguas de lluvia. Esta capa edáfica es la que ha sido estudiada por nosotros, a partir de numerosas muestras de unos 10 a 15 cm de profundidad, recogidas en diferentes puntos de la superficie de los taludes de cada uno de los VRSU. Inicialmente fueron analizadas 26 variables físicoquímicas.

La cubierta edáfica de sellado y los suelos de las áreas de descarga de los vertederos ha venido siendo monitoreada por nosotros en numerosas ocasiones a lo largo de todos los años transcurridos hasta el día de hoy, así como las zonas de descarga, principales áreas donde se acumula los contaminantes y por ende sus efectos son más dañinos. Todo se ha hecho mediante la toma de muestras de la capa superficial edáfica. El número inicial de muestras fue en un principio de alrededor de unas 70, y en cualquiera de las ocasiones en que se han vuelto a recoger no han superado a la centena, dependiendo lógicamente del número de taludes que se iban superponiendo en los vertederos que comenzamos a estudiar.

Con las muestras de suelos se siguieron los protocolos y técnicas de estudio habituales (MAPA 1982; Hernández y Pastor 1989), una vez secadas, fueron tamizadas por un tamiz de 2 mm; una parte de las mismas fueron molidas mediante un mortero de

ágata con el fin de determinar a continuación los contenidos de materia orgánica y de metales pesados. Y ya últimamente, en nuestros laboratorios del CCMA, CSIC, se han puesto a punto toda una serie de técnicas, de las que se habla en otros capítulos de este libro, y hemos podido comenzar a realizar el análisis de los contaminantes orgánicos existentes en los vertederos, siguiendo las técnicas homologadas en nuestro país, en la UE, o en su defecto por la EPA norteamericana.

En cada vertedero inicialmente, en los primeros años del sellado, se realizaron a lo largo de tres años consecutivos diversos muestreos de suelos acompañados de inventarios fitoecológicos, eligiendo como tamaño de muestreo de las parcelas 1 m², dado la enorme heterogeneidad espacial de los parámetros edáficos, tanto en los diferentes taludes como en las plataformas de los vertederos, para llegar a conseguir un inventario fitoecológico relativamente completo.

Después de variados muestreos realizados desde la época inicial, y por los compromisos contraídos con los numerosos Proyectos de Investigación concedidos por las diferentes administraciones, ahora, después de aproximadamente algo más de una veintena de años de su primer sellado, han vuelto a ser muestreados en profundidad. Especialmente y lógicamente está siendo primado el estudio de aquellos vertederos donde se están presentado mayor cantidad y más importantes problemas medioambientales

Morfología de los vertederos sellados: plataformas, taludes y áreas de descarga

La superficie que ocupa cada vertedero ha ido variando después de su primer sellado en la mayoría de los mismos, a causa de posteriores deposiciones de residuos (en alguno se han serrado las traviesas de hierro que impedían acceder al mismo, para seguir vertiendo hasta el día de hoy). Si bien en la actualidad se ha llevado a cabo un control respecto a la recuperación en los vertederos de El Álamo y en el macrocomunitario de Pinto (Pinto antiguo en la Tabla 1), en el resto podemos decir que se mantienen las características señaladas desde su sellado.

En la Tabla 1 se muestran algunas de las características más globales de los vertederos considerados en este estudio.

Ya hemos hecho alusión a que los residuos depositados en los vertederos, son de carácter mixto (sólidos urbanos, industriales e inertes). El material edáfico de cobertura no sobrepasó en la mayoría o en muchos puntos de los vertederos, los 40 cm de profundidad.

Los taludes tienen por lo general más de 15 m de altura y, en ocasiones, están superpuestos debido a las posteriores reutilizaciones para nuevos vertidos encima de lo inicialmente sellado.

Por otra parte, presentan pendientes muy acusadas, por encima del 40% en muchos de ellos.

Tabla 1. Vertederos sellados de la Comunidad de Madrid objeto de este trabajo.
(La terminología empleada corresponde al primer nombre de los municipios correspondientes)

Localidad & Sustrato	Año sellado	Ecosistema descarga prcpal.	Usos e incidencias posteriores al sellado	N.º total taludes 2006
Granitos y Gneis				
Colmenar Viejo	1986	Pasto vacuno	Pastoreo itinerante de ovino; vallado y reforestación con pinos.	3
San Lorenzo	1987	Vaguada	Ardió a los dos años; pastoreo itinerante de ovino y vacuno; urbanización en área de descarga	3
El Escorial	1988	Fresneda	Reutilización vertido de escombros y pasto de vacuno	4
Arcosas				
Móstoles	1987	Humedal	Cultivo cereal en plataforma y pastoreo itinerante de ovino; rutas a caballo	1
Villaviciosa	1987	Ladera y humedal	Uso para recreo y senderismo	1
Navalcarnero	1989	Pasto ovino	Cultivo de cereal; campo de tiro; nueva utilización para vertidos; urbanización actual	—
Calizas y Margas				
Alcalá de Henares	1986	Vaguada	Siembra de acacias; otras siembras de arbóreas; siembras con riego del río	1
Torrejón urbano	1982	Humedal	Siembra de pinos; uso para nuevos vertidos y más rellenos del humedal con vertidos	3
Torrejón industrial	1991	Humedal con <i>Tamarix</i>	Nuevos vertidos de escombros; nuevo sellado en 1994; nuevas deposiciones y nueva clausura	> de 12
Mejorada	1986	Ladera y vaguada	Pasto itinerante con ovino; campo de tiro; reestructuración por el AVE; reforestación con pinos; siembra de herbáceas no autóctonas.	3
Getafe	1986	Humedal	Reutilizado para nuevos vertidos de inertes y de escombros industriales	> de 12
Pinto 1 (antiguo)	1986	Ladera y vaguada	Reutilizado para nuevos vertidos; actualmente en uso y controlado	4
Arganda	1987	Ladera y vaguada	Incontrolado, se siguen depositando basuras e inertes	3
Pinto 2 (pinos)	1993	Cultivo cereal	Repoblación de pinos	2
Pinto 3 (sin pinos)	2006	Cultivos cereal	Depósitos de inertes	4
El Álamo	1996	Pasto vaguada	Repoblación con pinos, repoblación con cubiertas herbáceas	
La Poveda	1990	Arroyo	Deposición residuos del trazado del AVE	—
Yesos				
Aranjuez	1987	Arroyo	Ardió a los tres años; corrección de elevadas pendientes por desmoronamiento	1

Las características de los taludes afectan no sólo a la colonización de la vegetación de estos sistemas, sino también a las áreas de descarga de los lixiviados de escorrentía superficial. Incluso, en el caso de tener un sólo y enorme talud (caso de Móstoles), su escorrentía presenta un modelo en abanico, por lo que afecta de forma diferente a la biodiversidad del área de descarga. Además, como ya señalamos, suele haber bastante variación en los parámetros edáficos en un mismo talud. También existen las lógicas diferencias en los parámetros fitoedáficos, en relación a los suelos utilizados en su cobertura, procedente de distintos y variados sustratos litológicos.

Con el fin de aportar un escenario más concreto, se exponen en la Tabla 2, datos relativos a tres de los taludes del vertedero antiguo de Pinto, que a los 10 años de su primer sellado, con una longitud de 206 m en paralelo a la carretera, ya presentaba nuevos ta-

ludes superpuestos, correspondientes a posteriores deposiciones de residuos. En dicha Tabla puede apreciarse que aumenta la altura de los mismos (denominados en este caso 1.º y 2.º, siguiendo la deposición de basuras).

Tabla 2. Características de los tres taludes de orientación sur del vertedero de Pinto (antiguo) en 1995 (antes del proyecto de control); (M: media de 10 medidas al azar a lo largo y ancho del talud y la diversidad vegetal medida por el nº de especies).

	TALUD A recto	TALUD B recto	TALUD C cóncavo
Orientación	Sur 180º	Sur 180º	Sureste 160º
Longitud	51 m	60 m	95 m
Altura	1º/ 10m 2º/ 13m	1º/ 10m 2º/ 14m	1º/ 14m 2º/ 28m
Pendiente M/rango	17º / 14-19º	15º / 9,8-23º	21º / 15,8-24,6º
Rto. Vegetal total	80 %	75 %	75 %
Diversidad vegetal.	49	55	48
Especies que imprimen fisonomía	<i>Hordeum murinum</i> <i>Malva parviflora</i> <i>Dactylis glomerata</i>	<i>Hordeum murinum</i> <i>Malva parviflora</i> <i>Erodium ciconium</i> <i>Sisymbrium irio</i>	<i>Hordeum murinum</i> <i>Malva parviflora</i> <i>Carduus tenuiflorus</i>

Hay otros casos en que, a pesar de ser utilizado nuevamente el vertedero después de haber sido clausurado, ha seguido la deposición de escombreras con escombros domésticos, envases, trozos de metales oxidados, montículos de yeso, nuevos restos de variados residuos industriales (caso del vertedero de Getafe, por ejemplo). Residuos industriales que en este último vertedero, en el día de hoy, están siendo arrancados por gentes de aspecto no muy recomendable, que llega en furgonetas y pequeños camiones, porque deben tener actualmente algún valor de mercado, ya que están constituidos por residuos de fundición de metales, principalmente hierro. En muchos casos los denominados «residuos inertes» han servido para tapar otros vertidos de naturalezas mas que dudosas, como hemos comprobado (caso de los vertederos de Navalcarnero y de Torrejón industrial).

Para la tipificación de la morfología de los taludes se sigue lo expuesto en Hernández y Pastor (2008) para los mismos.

Por lo que se refiere a las plataformas, así llamadas por ser zonas que no presentan apenas pendiente, están principalmente situadas en las cotas más altas del vertedero. En algunos casos, algunas o parte de las mismas, se utilizaron en los años siguientes al primer sellado para cultivos cerealistas (cebada en Móstoles y trigo en Navalcarnero). Pudimos, en aquellos primeros años, observar que en el caso de no haberse realizado ninguna siembra, las lluvias copiosas o las fuertes tormentas, ocurridas en las épocas de invierno y primavera, gran parte de las cubiertas fueron arrastradas en algunos de los vertederos y otras quedaban con grandes charcos de aguas aprovechadas para beber los animales fundamentalmente ovejas, conejos y liebres (como ocurrió muchos años en el vertedero de «La Rendija», en Mejorada).

Otra característica común a todos estos vertederos es su ubicación, a la que anteriormente aludimos, más o menos próximos a cursos de agua, y que también reciben aportaciones de las aguas subterráneas del lugar. En otras palabras, dichos vertederos se encuentran localizados en las áreas de descarga de acuíferos libres o acuitardos con sis-

temas de flujo en general locales y donde el nivel freático está durante la mayor parte del año muy próximo o relativamente cercano a la superficie topográfica (Adarve y Rebollo, 1993; Adarve et al., 1994; Pastor *et al.* 1993b). Además, la propia morfología de los vertederos favorece la llegada de los lixiviados de escorrentía superficial, lo que conlleva la presencia de suelos con elevada humedad edáfica, que se encuentran encharcados durante varios meses al año en las zonas ubicadas al pie de los vertederos, lo que es de considerable importancia en los casos en los que la profundidad de las aguas subterráneas es mayor.

Caracterización de la cubierta edáfica de plataformas y taludes y de los suelos de las áreas de descarga

El material de la cubierta edáfica de sellado consiste en una capa de unos 20-50 cm de espesor de tierras y escombros del entorno que no contribuyen a su impermeabilización frente a las aguas de precipitación.

En la Tabla 3 se exponen los resultados relativos a los parámetros físicos de los suelos, teniendo en cuenta los valores medios que alcanzan las variables analizadas de todas las muestras de suelo recogidas en cada vertedero. Ello se hace en relación a los suelos de los ecosistemas de referencia de sus respectivos entornos que no hayan sido impactados por la situación de los vertederos. Igualmente en la Tabla 4 se muestran los parámetros de carácter químico.

Tabla 3. Datos granulométricos y de las curvas de pF (%), valores medios y desviaciones típicas de las cubiertas de los vertederos (plataformas y taludes) y de sus ecosistemas de referencia, agrupados según los substratos geológicos donde se ubican, en los primeros años, después de su 1^{er} sellado.

Variables edáficas	Granitos y Gneises		Arcosas		Calizas y Margas		Yesos	
	Vertederos	Ecosistema referencia	Vertederos	Ecosistema referencia	Vertederos	Ecosistema referencia	Vertederos	Ecosistema referencia
Arcilla	12±0,9	9,3±1,2	20±4,3	18±7,0	23±3,4	19,6±2,0	11,7±2,9	17,6±3,4
Limo	19±1,5	20±2,3	23±7,8	15±3,4	26±2,1	27±8,9	11,2±3,5	23±4,2
Arena total	69±2,3	71±3,0	56±14	67±8,1	51±1,1	54±8,1	66±16	60±13,7
Arena gruesa	48±3,0	45±2,9	36±10	49±8,9	27±4,4	29±3,5	15±5,7	16±4,9
Arena fina	21±2,1	26±3,1	20±2,6	18±5,7	23±3,3	25±4,1	51±10,6	44±7,5
Cap. Campo	11±1,0	15±2,4	19±4,1	16±5,9	22±4,3	17±2,9	20±3,5	14±2,3
Pto. Marchitez.	5,9±0,6	6,9±1,2	10±3,1	9,9±3,1	13±0,8	10±0,7	12±1,3	9±0,9
Agua útil	5,0±0,5	7,7±1,3	8,3±1	6,3±3,0	9,1±3,5	6,4±2,3	8,2±2,4	5,3±1,1

Esta capa edáfica ha sido estudiada por nosotros, a partir de muestras medias recogidas en diferentes puntos de la superficie de los taludes de cada uno de los vertederos así como de sus principales áreas de descarga de los lixiviados de escorrentía superficial. En ellas fueron analizadas inicialmente 26 variables físicoquímicas correspondientes como ya hemos dicho a los primeros años que siguieron al primer sellado. Después de 20 años y más, se han recogido y analizado ampliando la lista de estudio de los metales pesados, e introduciendo el análisis de todos los compuestos orgánicos considerados no-

civos a nivel del Estado español y la UE. Inicialmente se ha realizado este muestreo primordialmente en los suelos de descarga, al ser generalmente, pero no siempre, los más contaminados por los arrastres de los suelos de los taludes y por los lixiviados superficiales.

Tabla 4. Variables químicas analizadas (medias y desviaciones típicas) en las cubiertas edáficas de los vertederos (plataformas y taludes) sellados con suelos procedentes de sus respectivos entornos y sobre análogos substratos.

Variables edáficas	Granitos y Gneis		Arcosas		Calizas y Margas		Yesos	
	Vertederos	Ecosistemas referencia	Vertederos	Ecosistemas referencia	Vertederos	Ecosistemas referencia	Vertederos	Ecosistemas referencia
pH	7,0±0,2	5,8±0,2	7,1±0,4	6,2±0,2	7,6±0,1	7,7±0,1	7,6±0,3	7,8±0,1
M.O. (%)	1,5±0,5	2,1±0,7	0,6±0,3	3,3±2,1	1,5±0,03	2,1±0,6	0,36±0,3	2,2±0,7
N total (%)	0,08±0,03	0,22±0,04	0,03±0,01	0,14±0,01	0,09±0,06	0,16±0,01	0,05±0,00	0,20±0,05
C/N	11,6±4,5	13,6±2,4	10,8±2,5	15,4±12,8	11±4,4	7,8±3,7	4,3±4,1	6,5±5,3
P (mg/100g)	21,1±19,2	3,8±1,3	13,2±9,0	5,0±2,9	6,3±2,5	6,0±0,6	9,0±1,3	8,5±1,1
Na (mg/100g)	1,8±0,7	0,5±0,1	6,9±3,7	1,5±1,3	1,3±0,2	0,5±0,0	1,9±1,5	0,6±0,4
K (mg/100g)	17,2±9,5	8,7±1,8	22±3,8	22±11	32±9,9	13,0±3,4	13,1±1,1	39±6,1
Ca (mg/100g)	350±173	72±16	335±145	215±70	715±65	438±70	1397±1108	430±96
Mg (mg/100g)	9,6±3,6	51±0,8	37±23	29,9±12	25±2,8	9,0±1,0	6,60±1,7	11,8±2,3
B (mg/Kg)	63,5±7,1	15±2,2	13,5±11,2	2,5±5,3	43±10	0,0±0,0	60,7±21	0,0±0,0
Fe (mg/Kg)	5255±2547	480±186	13891±1856	9091±4216	91±42	80,0±31	126±49	190±53
Zn (mg/Kg)	126±70	74±31	84±146	31,9±9,6	58±11	31±9	33,3±5,7	41±15
Cu (mg/Kg)	8,7±19	0,0±0,0	150,9±730	18,5±30	13±11	0,0±0,0	5,0±5,2	0,0±0,0
Pb (mg/Kg)	7,7±5,6	19±4,2	73±297	7,7±22	29±3,5	11±2,0	0,0±0,0	0,0±0,0
Cd (mg/Kg)	0,0±0,0	0,0±0,0	1,5±3,1	0,1±1,5	0,0±0,0	0,0±0,0	0,0±0,0	0,0±0,0
Cr (mg/Kg)	0,0±0,0	0,0±0,0	4,4±4,5	2,5±2,6	0,0±0,0	0,0±0,0	0,0±0,0	0,0±0,0
Ni (mg/Kg)	22±3,6	0,0±0,0	16±8,1	7,0±5,9	23±3,5	0,0±0,0	18±1,2	0,0±0,0
Co (mg/Kg)	0,0±0,0	0,0±0,0	1,5±2,3	0,0±0,0	0,0±0,0	0,0±0,0	0,0±0,0	0,0±0,0

Tabla 5. Diferencias en los parámetros edáficos (t de Student) entre los suelos de las cubiertas de los vertederos ubicados sobre substratos arcóscicos y los de los ecosistemas de referencia (suelos de pastos) en lo primeros años después de su sellado.

Parámetros del suelo	Cubiertas edáficas de los vertederos arcóscicos		Referencia (suelos de pastos del entorno del vertedero)		Nivel de significación
	X ± s.d.	Rango	X ± s.d.	Rango	
pH	7,1±0,3	6,3-7,6	6,2±0,5	5,1-7,1	99,9
OM	0,7±0,4	0,2-1,6	3,5±2,7	0,2-12,2	99,9
Fe	15291±6455	5047-28453	9057±4029	2315-21945	99,9
Mn	223±113	46-552	112±88	40-269	99,9
Zn	89±157	13,8-960	32±11	9,7-5,8	99,0
Cu	187,1±740,8	2,5-3680	19,6±32,1	0-63	
Pb	89,8±313	0-797	8±22,8	0-11,3	
Cd	1,9±3,4	0-10	0,1±1,6	0-6,1	90,0 F
Cr	4,6±4,7	0-17	2,7±2,8	0-6	
Ni	14,0±9,2	0-32	7,4±6,3	1,6-21	95,0
Co	1,9±2,6	0-9	0,0±0,0	0-1,9	99,0
Al	37404±13696	15250-65790	24783±11062	5700-54300	99,9
B	5,5±11,8	0-50	2,6±5,5	0-20	

En la Tabla 5 podemos ver ya, la existencia de diferencias altamente significativas, significativas y fiables (90%), entre las medias de las muestras de las cubiertas de sellado de los vertederos situados sobre sustratos arcósicos (en un momento diferente a los datos mostrados en la Tabla anterior) y los suelos del entorno. Únicamente no existieron diferencias significativas en los casos del Cu, Pb, Cr y B, debidas, en parte a las elevadas desviaciones típicas de algunos de estos metales.

No solo existen importantes diferencias en los parámetros edáficos, según los sustratos litológicos donde se encuentran ubicados los vertederos, sino que es importante saber que también existen grandes diferencias, como brevemente señalamos anteriormente, entre muestras de suelos recogidas en un mismo vertedero. Así, como ejemplo en la Tabla 6, pueden observarse dichas importantes diferencias, tanto en el caso de un vertedero calizo como uno arcósico (Mejorada y Móstoles)

Tabla 6. Variación de parámetros edáficos (pH y Conductividad eléctrica) en suelos de los taludes y de sus respectivas plataformas después de diez años de sellado en los vertederos de Mejorada del Campo y Móstoles (suelos básico y ácido).

	Mejorada	pH	Móstoles	Conductividad (µS/cm)		
		///		Mejorada	///	Móstoles
Talud 1	7,8-7,9-7,6		7,1-7,1-7,4	297-361-460		706-484-452
Talud 2	7,6-7,7-7,7		7,3-7,4-4,2	395-553-314		450 -494-669
Talud 3	7,9-7,6-7,6		3,4-3,2-7,4	564 -551-810		1,032-1,882-394
Plataforma	7,9-7,7-7,9		2,1-2,7-2,6	282-364-405		2,810-2,690-2,620

Tabla 7. Conductividad eléctrica (C.E.) y aniones del suelo en las áreas de descarga de algunos vertederos (V) localizados sobre diferentes sustratos, comparados con los suelos de los ecosistemas de referencia (E.R.) del entorno.

		Arganda		Alcalá		Torrejón urbano		Getafe	
		V.	E. R.	V.	E. R.	V.	E. R.	V.	E. R.
Parámetros edáficos									
C.E. (µS/cm)	M.	1430	530	3890	1200	8065	2960	11045	3940
	d.t.	156		735		3386		6583	
Cloruros (mg/kg)	M.	33,5	5,0	22,0	5,0	177,5	7,0	76,5	18,0
	d.t.	7,8		2,8		209,7		10,6	
Sulfatos (mg/kg)	M.	68,5	1,0	155,5	4,0	521,0	345,0	4544,0	412,0
	d.t.	3,5		3,5		198,5		5883,1	
Nitratos (mg/kg)	M	4,2	2,0	3,9	0,5	9,1	2,5	31,3	19,8

Las Tablas 7 y 8 abundan en estas mismas cuestiones. La tabla 7 muestra la C.E. y los contenidos de cloruros, sulfatos y nitratos en cuatro vertederos ubicados sobre sustratos calizo-margosos, en donde pueden observarse las, en general, enormes diferencias entre los valores de C.E. y aniones de los suelos de las zonas de descarga de los cuatro vertederos y los que presentan los suelos de los cercanos ecosistemas de referencia.

Tabla 8. Variación de aniones (mg/kg) en la cubierta edáfica de tres vertederos sobre substratos arcósicos, a los seis años de su sellado inicial, en relación a la revegetación surgida del banco de semillas de los suelos de cubrición.

VRSU	Sulfatos	Cloruros	Nitratos	Fluoruros
Mejorada del Campo				
Suelo bajo gramíneas	10,5	14,8	10,0	1,2
Suelo bajo leguminosas	23,4	20,8	7,3	1,3
Suelo desnudo	47,8	374,4	36,7	3,3
Móstoles				
Suelo bajo gramíneas	11,0	5,6	0,9	1,4
Suelo bajo leguminosas	15,9	10,6	0,9	0,9
Suelo desnudo	11,0	3,3	0,9	0,9
Navalcarnero				
Suelo bajo gramíneas	11,1	8,3	3,8	0,9
Suelo desnudo	123,4	145,6	43,3	0,9

Tabla 9. Contenido de aniones (mg/kg) y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) encontrados en los suelos de los vertederos unos 20 años después de su sellado (2007-08).

Vertederos	F	Cl	NO ₂	NO ₃	PO ₄	SO ₄	C.E.
Colmenar Viejo	0,7	53,8	1,4	51,7	22,1	64,3	244
San Lorenzo	0,4	9,7	2,6	544,3	16,7	46,1	669
El Escorial	0,4	15,1	3,7	783,1	13,4	73,3	606
Móstoles	0,8	65,3	1,0	64,9	30,7	852	160
Villaviciosa	0,3	9,6	6,1	74,5	45,8	19,3	392
Navalcarnero	0,7	4,9	1,3	167,5	9,8	17,7	101
El Alamo	0,3	10,8	2,7	13,6	34,9	14,8	106
Pinto 1	3,6	9,8	5,3	9,3	5,1	17,2	190
Pinto 2	4,6	5,8	8,2	7,3	0,0	17,2	184
Pinto 3	1,6	30,9	3,0	409,1	8,3	676,9	759
Getafe	8,6	7570	2,9	495	5,4	5918	8220
La Poveda	2,9	10,8	4,4	70,8	5,3	774	645
Arganda	1,4	64,4	5,6	19795	2,5	3164	1947
Mejorada	4,9	55,0	2,3	298,5	6,3	1195	1248
Alcalá	0,9	43,9	8,4	443,3	28,3	102	650
Torrejón 1	3,7	89,2	123,8	252,6	3,8	7133	3210
Torrejón 2	54,8	93,6	3,4	39,2	4,6	2240	2610
Aranjuez	1,3	20,3	2,7	189,4	3,8	4065	2440

Los análisis multivariantes de componentes principales, realizados con los parámetros edáficos evaluados en los suelos de las zonas de descarga (Hernández *et al.*, 1998-a), muestran que en la organización de la estructura de los suelos de vertederos juega un papel prioritario, la mayor o menor retención de agua en la capa superficial, tanto en los suelos ácidos y más arenosos, como en los básicos y con mayor proporción de limos y arcillas. No obstante, y según los diferentes sustratos, los restantes factores principales, revelan la importancia de determinadas variables del suelo, en cuanto a la organización de estos sistemas edáficos.

Así, en los suelos ácidos, los cloruros, nitratos y sales sódicas, constituyen un segundo nivel de jerarquización de la estructura edáfica de los vertederos. En los suelos básicos, sin influencia de yesos, el segundo gradiente de variación es la pedregosidad-terrosidad y no pesan tanto los niveles de cationes básicos, como sí sucedía para los

suelos ácidos, aunque sí lo hace el B^{+++} . En los suelos básicos con influencia de yesos, el sulfato y el Zn^{++} juegan un papel primordial en el primer factor, siendo también importantes los elementos gruesos en superficie.

En la Tabla 9 ya podemos ver los valores medios de los contenidos en aniones y en los valores de C.E. de los suelos de las zonas de descarga de los vertederos estudiados.

Tabla 10. Contenidos medios y desviaciones típicas de As, Al, Fe, Mn y metales pesados (mg/kg) en los suelos de los vertederos estudiados (2006-2009).

Vertederos		n.º	Zn	Cu	Pb	Cd	Cr	Ni	Fe	Mn	Al	As
<i>Granitos y Gneis</i>												
Colmenar Viejo	Media	6	51,6	11,7	10,1	n.d.	1,6	2,8	16429	192,0	26144	n.d.
	d. típica		14,4	1,7	3,0		1,5	1,9	5181	91,5	5982	
El Escorial	Media	4	351,8	113,6	99,6	n.d.	10,1	6,0	36971	289,9	22091	n.d.
	d. típica		331,0	31,1	80,8		9,8	5,5	27493	131,6	5146	
San Lorenzo	Media	4	101,4	21,4	89,3	n.d.	5,6	4,6	19569	189,8	26947	n.d.
	d. típica		57,0	12,5	89,1		5,0	1,1	1824	23,5	2945	
<i>Arcosas</i>												
Móstoles	Media	14	24,4	4,4	4,1	n.d.	1,6	1,6	8474	119,9	14685,3	n.d.
	d. típica		8,2	2,0	2,4		0,7	0,8	2052	51,7	4711	
Navalcarnero	Media	2	12,2	3,5	2,5	n.d.	1,3	1,0	4944	188,8	8199	n.d.
	d. típica		0,3	1,0	0,4		0,5	0,04	106	18,2	771	
Villaviciosa de Odón	Media	2	66,5	26,1	17,7	n.d.	1,2	2,6	15315	182,0	24260	n.d.
	d. típica		37,9	14,1	10,0		0,1	0,4	231	43,9	3523	
El Alamo	Media	3	21,4	5,6	3,5	n.d.	1,8	1,1	3727	86,6	7150	n.d.
	d. típica		4,7	2,1	0,8		0,2	0,4	390	5,3	1903	
<i>Calizas y Margas</i>												
Arganda	Media	8	42,8	13,6	22,1	n.d.	2,8	4,2	12656	136,5	23932	n.d.
	d. típica		32,0	5,6	26,9		2,5	1,5	2704	34,7	5535	
Alcalá de Henares	Media	4	90,5	16,4	12,8	n.d.	6,0	10,5	23516	214,2	30842	n.d.
	d. típica		28,7	6,3	0,7		4,1	4,2	9564	77,1	20739	
Pinto antiguo	Media	6	100,4	26,8	24,6	n.d.	12,7	4,3	21820	326,8	34838	n.d.
	d. típica		31,7	14,4	14,3		14,1	0,6	3761	150,8	7948	
Pinto repobl. pinos	Media	8	48,4	8,4	7,5	n.d.	0,25	5,7	16850	224,3	30077	n.d.
	d. típica		12,3	2,2	1,7		0,07	1,6	3264	50,5	5816	
Pinto sin repobl. pinos	Media	11	52,8	8,6	7,5	n.d.	0,20	6,0	18555	227,6	33179	n.d.
	d. típica		13,5	0,9	2,8		0,28	2,0	4265	37,6	7114	
Torrejón urbano	Media	35	300,0	253,9	149,8	2,3	22,6	29,5	16592	283,8	23293	n.d.
	d. típica		339,4	634,4	203,0	7,3	48,5	38,4	6523	219,2	9114	
Torrejón industrial	Media	16	64,4	24,7	19,3	n.d.	39,8	25,6	17854	269,3	22045	n.d.
	d. típica		42,6	26,9	18,5		60,3	32,2	15784	216,2	15156	
La Poveda	Media	2	45,2	21,0	8,9	n.d.	2,2	7,3	15474	179,9	21998	n.d.
	d. típica		6,2	9,7	6,3		0,7	2,6	6020	64,1	9882	
Mejorada	Media	8	83,0	22,2	11,8	n.d.	4,5	8,8	24703	248,6	40603	n.d.
	d. típica		29,1	3,3	5,1		1,9	3,8	8206	55,4	14459	
Getafe urbano	Media	28	4846,5	661,1	3086,4	59,9	82,4	69,5	59422,2	1809,2	24743,6	n.d.
	d. típica		6951,2	1006,6	5261,6	101,5	174,9	93,1	88254,2	2149,2	10119,7	
Getafe escombrera 1	Media	10	710,2	112,2	92,8	0,7	6,6	33,0	30198,1	587,0	25467,1	n.d.
	d. típica		652,0	237,2	77,0	1,2	6,5	67,2	38631,1	669,6	9802,5	
Getafe escombrera 2	Media	12	248,0	459,5	123,1	0,3	3,5	21,9	28872,6	506,2	33078,6	0,0
	d. típica		270,7	1401,8	294,3	0,5		28,0	17374,6	292,6	7835,5	
Getafe escombrera yeso		1	113,6	127,55	4,35	0,0	—	9,2	38205,2	527,65	59718,5	n.d.
<i>Yesos</i>												
Aranjuez	Media	6	37,4	20,1	2,7	n.d.	1,06	4,4	14825	140,7	28522	n.d.
	d. típica		26,2	24,4	4,4		0,76	5,2	11784	62,9	1844	
Nivel referencia		190	140	36	50	0,8	100	35	—	—	—	—
Suelos agrícolas (WHO)												

Podemos afirmar que estos resultados son análogos a los presentados en los suelos de las áreas de descarga de muchos de los vertederos recientemente evaluados. No obstante, nos hemos de atener también a los metales pesados que han sido puestos de manifiesto después de 20 años del sellado (Tabla 10). En dicha Tabla 10, podemos ver que los valores alcanzados por los contenidos medios de distintos metales pesados Zn, Cu, Pb, Cd y Ni, en varios vertederos, especialmente Getafe (vertedero y escombreras), Torrejón de Ardoz (urbano) y El Escorial, sobrepasan, en casos mas que ampliamente, los valores de los suelos de uso agrícola. Mucho más espectaculares serían los resultados, si en lugar de las medias se mostrasen los valores individuales de los suelos de las diferentes zonas de los vertederos, que como ecosistemas pastoreados que son por ganado ovino, caprino y fauna de valor cinegético, además de afectar a los animales que consuman las plantas que allí crecen, lo harán también a las personas que consuman su carne y leche.

Por último, en la Tabla 11 se pueden observar los compuestos orgánicos en los suelos de las zonas más bajas de los taludes de los vertederos.

Tabla11. Contaminantes orgánicos (mg/kg) encontrados en los antiguos vertederos sellados (años 2008-09).

Vertederos	Compuestos fenólicos	Insecticidas clorados	Hidrocarburos	PCBs	PAHs
Colmenar Viejo San Lorenzo		Lindano, Hexaclorobenceno			
El Escorial			58,21	0,054	Benzo(a)pireno Dibenz(a,h)antraceno
Móstoles Villaviciosa Navalcarnero El Alamo	Fenol (0.033)	Lindano Lindano Lindano			
Pinto antiguo	2-clorofenol 2,4,5-triclorofenol, 2,4,6-triclorofenol, 2,4-diclorofenol, Pentaclorofenol	Hexaclorobenceno			
Pinto pinos Pinto sin pinos Getafe La Poveda Arganda Mejorada		Lindano; Hexaclorobenceno p,p'-DDD Lindano (gamma-HCH) Lindano Lindano (gamma-HCH)	62,34 854,41 59,7		Benzo(a)pireno Benzo(a)pireno
Alcala Torrejón 1	Pentaclorofenol Cresoles Cresoles, Pentaclorofenol Fenol	Lindano; p,p'-DDE	189,9	0,131	Benzo(a)pireno
Torrejón 2	Fenol, Cresoles	Lindano, Hexaclorobenceno	228,97	0,06	Benzo(a)pireno
Aranjuez				0,023	
Niveles Referencia		0,01(Lindano)	50,0	0,01	

La cubierta vegetal de los vertederos y de sus áreas de descarga durante la primera década del sellado

Los suelos de los antiguos vertederos sellados de la Comunidad de Madrid al ser de carácter mixto, es decir de residuos sólidos urbanos e industriales, se encuentran entre los enclaves de suelos más contaminados existentes en la misma, por el contenido en metales pesados. No obstante, queremos presentar en este apartado una visión sintética sobre las principales especies vegetales que crecían en sus plataformas y taludes durante los primeros años de su sellado inicial. En la mayoría de los vertederos, a los problemas de salinización-contaminación creciente del suelo en las zonas bajas de los taludes y en las zonas de descarga (Adarve *et al.*, 1998; Hernández *et al.*, 1998-b), se han unido con el paso de los años fuertes procesos erosivos.

La cubierta vegetal espontánea existente sobre los suelos que cubren los vertederos vino inicialmente determinada por el banco de semillas que contenían los suelos utilizados en el sellado que, por lo general, correspondía a suelos del entorno (Pastor y Hernández, 2002). La gran mayoría de ellos provenían de antiguos suelos agrícolas de secano que fueron vacuados para la creación o ampliación de polígonos industriales y por la existencia en el entorno de cada uno de ellos, de especies, muchas de ellas de retamares o espartales, cuyos propágulos llegaron a los mismos.

Podemos decir que en los vertederos situados sobre sustratos graníticos se inventariaron cerca de 170 especies herbáceas en total; unas 300 en los ubicados sobre arcosas; cerca de 230 en los situados sobre sustratos de calizas y margas, y alrededor de 100 especies en el vertedero sobre yesos de Aranjuez.

Las Gramíneas constituyen la familia más representada, en frecuencia, de especies en los vertederos sobre granitos, yesos y margas yesíferas, mientras que en los vertederos arcósicos y calizo-margosos son las de la familia de las Compuestas, como ocurría en el vertedero de Pinto, antes del plan de recuperación del mismo (Tabla 12).

En general predominan con toda lógica las especies del género *Bromus*, que son las más comunes en todos ellos (*B. rubens* y *B. madritensis*, las que más), y corresponde a las As. del Subord. *Bromenalia-rubenti-tectori*, pioneras en los cultivos cerealistas de secano abandonados, así como las especies de *Aegilops*.

Tabla 12. Diversidad (n.º total o riqueza de especies) de las principales familias botánicas en el vertedero de Pinto durante la primavera de su 10.º año del sellado inicial.

Familias botánicas	Total	Talud A	Talud B	Talud C
Compuestas	16	14	15	11
Gramíneas	12	11	11	9
Crucíferas	9	8	5	5
Leguminosas	3	2	2	1

La Compuesta mejor representada es *Anacyclus clavatus*, acompañada de *Andryala integrifolia* y *Carduus tenuiflorus* en los vertederos arcósicos y, además de *Chondrilla juncea* y *Silybum marianum* en los calizo-margosos. Por último, *Hirschfeldia incana* y *Spergularia rubra*, son la Crucífera y Cariofilácea, respectivamente, mejor representadas en todos los grupos de vertederos, en aquellos primeros años.

Como puede apreciarse en la Tabla 12 las especies colonizadoras de los taludes del vertedero corresponden especialmente a aquellas familias que tienen buena dispersión de sus semillas (Compuestas, Gramíneas y Crucíferas). El resto de las especies pertenecen a familias con menores abundancias, si bien todas ellas correspondientes a etapas pioneras de la sucesión ecológica.

Tabla 13. Porcentaje de especies, organizadas por familias, y ordenadas en sentido decreciente por el nº de especies, encontradas en los vertederos sobre sustratos de carácter ácido (arcósicos y gneísico-graníticos).

Familias Botánicas	n.º total de especies	% sobre el n.º total de especies
Gramíneas	70	21,54%
Leguminosas	47	14,46%
Compuestas	73	22,46%
Cariofiláceas	16	4,92%
Crucíferas	14	4,31%
Escrofulariáceas	10	3,08%
Boragináceas	8	2,46%
Poligonáceas	7	2,15%
Geraniáceas	6	1,85%
Labiadas	6	1,85%
Malváceas	6	1,85%
Umbelíferas	6	1,85%
Liliáceas	5	1,54%
Plantagináceas	5	1,54%
Campanuláceas	4	1,23%
Ciperáceas	4	1,23%
Papaveráceas	4	1,23%
Quenopodiáceas	4	1,23%
Amarantáceas	3	0,92%
Juncáceas	3	0,92%
Resedáceas	3	0,92%
Rubiáceas	3	0,92%
Convolvuláceas	2	0,62%
Ranunculáceas	2	0,62%
Rosáceas	2	0,62%
Solanáceas	2	0,62%
Cistáceas	1	0,31%
Crasuláceas	1	0,31%
Equisetáceas	1	0,31%
Euforbiáceas	1	0,31%
Plumbagináceas	1	0,31%
Portulacáceas	1	0,31%
Primuláceas	1	0,31%
Urticáceas	1	0,31%
Verbenáceas	1	0,31%
Zigofiláceas	1	0,31%
TOTAL	325	100,00%

Visto el ejemplo de un vertedero sobre sustratos de carácter básico calizo-margosos, presentamos en la Tabla 13, un resumen-balance de la aportación que hacen las diferentes familias botánicas a la flora de los vertederos en nuestras latitudes, centrándonos

de manera voluntaria en las que más frecuentemente crecen en los suelos ácidos, pues en ellos es donde las especies absorben cantidades más elevadas de la mayoría de los metales pesados, pudiendo así mejor colaborar con la fitorremediación de estos suelos.

Tabla 15. Especies más frecuentes que crecen en VRSU sobre sustratos graníticos y gnéisicos

SUBSTRATOS GRANÍTICOS y GNEISICOS	
<i>Agrostis castellana</i> Boiss. & Reuter	<i>Malva sylvestris</i> L.
<i>Anacyclus clavatus</i> (Desf.) Pers.	<i>Marrubium vulgare</i> L.
<i>Andryala arenaria</i>	<i>Medicago lupulina</i> L.
<i>Andryala integrifolia</i> L.	<i>Medicago sativa</i> L.
<i>Andryala laxiflora</i> DC.	<i>Ornithopus compressus</i> L.
<i>Hymenocarpus lotoides</i> (L.) Vis.	<i>Paronychia argentea</i> Lam
<i>Bellardia trixago</i> (L.) All.	<i>Plantago coronopus</i> L.
<i>Biserrula pelecinus</i> L.	<i>Plantago lanceolata</i> L.
<i>Briza minor</i> L.	<i>Pulicaria paludosa</i> Link
<i>Bromus hordeaceus</i> L.	<i>Rumex crispus</i> L.
<i>Bromus tectorum</i> L.	<i>Senecio jacobaea</i> L.
<i>Carex divisa</i> Hudson	<i>Spergularia rubra</i> (L.) J et C Presl.
<i>Chamaemelum mixtum</i> (L.) All.	<i>Trifolium cernuum</i> Brot.
<i>Chondrilla juncea</i> L.	<i>Trifolium angustifolium</i> L.
<i>Cichorium intybus</i> L.	<i>Trifolium arvense</i> L.
<i>Crepis capillaris</i> (L.) Wallr.	<i>Trifolium campestre</i> Schreber
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers	<i>Trifolium cherleri</i> L.
<i>Cynosurus echinatus</i> L.	<i>Trifolium dubium</i> Sibth.
<i>Cynosurus elegans</i> Desf.	<i>Trifolium gemellum</i> Pourret ex Willd
<i>Dactylis glomerata</i> L.	<i>Trifolium glomeratum</i> L.
<i>Daucus carota</i> L.	<i>Trifolium hirtum</i> All.
<i>Echium vulgare</i> L.	<i>Trifolium scabrum</i> L.
<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'Her	<i>Trifolium smyrnaeum</i> Boiss
<i>Filago pyramidata</i> L.	<i>Trifolium striatum</i> L.
<i>Gaudinia fragilis</i> (L) Beauv	<i>Trifolium strictum</i> L.
<i>Heliotropium europaeum</i> L.	<i>Trifolium subterraneum</i> L.
<i>Hirschfeldia incana</i> (L.) Lagréze - Fossat	<i>Trifolium tomentosum</i> L.
<i>Holcus lanatus</i> L.	<i>Trisetum paniceum</i> (Lam.) Pers.
<i>Hordeum murinum</i> L.	<i>Vulpia myuros</i> (L.) C.C. Gmelin
<i>Lolium rigidum</i> Gaudin	

En las Tablas 15 a18, se recogen aquellas especies que resultan con una representación de al menos el 60% en cada uno de los grupos de VRSU considerados. Las especies de *Trifolium* son las leguminosas mejor representadas en los VRSU graníticos y arcóscicos, en los primeros años de sellado, para ir luego muchas de ellas desapareciendo, al aumentar la ruderalización de los suelos con el paso de los años. En estos vertederos también crecen dos especies de *Hymenocarpus*, dos de *Medicago*, y una de *Lathyrus*, *Ononis* y *Astragalus*. *Astragalus hamosus* es, además la leguminosa más frecuente que crece en los VRSU calizo-margosos, junto a *Coronilla scorpiodes*, *Medicago minima*, *M. sativa*, *M. orbicularis*, *M. sulcata*, *Trigonella polyceratia*, *T. monspeliaca* y *Ononis spinosa*.

Tabla 16. Especies más frecuentes que crecen en VRSU sobre sustratos arcósicos.

SUBSTRATOS ARCÓSICOS

<i>Aegilops geniculata</i> Roth	<i>Hirschfeldia incana</i> (L.) Lagréze - Fossat
<i>Aegilops triuncialis</i> L.	<i>Hordeum murinum</i> L.
<i>Agrostis castellana</i> Boiss. & Reuter	<i>Jasione montana</i> L.
<i>Agrostis pourretii</i> Willd.	<i>Lamium amplexicaule</i> L.
<i>Alyssum granatense</i> Boiss. & Reuter	<i>Leontodon longirrostris</i>
<i>Anacyclus clavatus</i> (Desf.) Pers.	<i>Lolium rigidum</i> Gaudin
<i>Andryala integrifolia</i> L.	<i>Marrubium vulgare</i> L.
<i>Hymenocarpus cornicina</i> (L.) Vis.	<i>Medicago polymorpha</i> L.
<i>Hymenocarpus lotoides</i> (L.) Vis.	<i>Ononis spinosa</i> L.
<i>Artemisia herba-alba</i> Asso	<i>Papaver rhoeas</i> L.
<i>Astragalus hamosus</i> L.	<i>Plantago coronopus</i> L.
<i>Avena barbata</i> Pott ex Link	<i>Plantago lagopus</i> L.
<i>Bellardia trixago</i> (L.) All.	<i>Poa trivialis</i> L.
<i>Bromus diandrus</i> Roth	<i>Polygonum aviculare</i> L.
<i>Bromus hordeaceus</i> L.	<i>Pulicaria paludosa</i> Link
<i>Bromus madritensis</i> L.	<i>Scolymus hispanicus</i> L.
<i>Bromus rubens</i> L.	<i>Silene colorata</i> Poir.
<i>Bromus tectorum</i> L.	<i>Silybum marianum</i> (L.) Gaertner
<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medicus	<i>Spergularia rubra</i> (L.) J et C Presl.
<i>Carduus tenuiflorus</i> Curtis	<i>Taeniatherum caput-medusae</i> (L.) Nevski
<i>Carthamus lanatus</i> L.	<i>Torilis nodosa</i> (L.) Gaertner
<i>Cerastium glomeratum</i> Thuill	<i>Trifolium angustifolium</i> L.
<i>Cichorium intybus</i> L.	<i>Trifolium arvense</i> L.
<i>Convolvulus arvensis</i> L.	<i>Trifolium campestre</i> Schreber
<i>Corynephorus fasciculatus</i> Boiss et Reuter.	<i>Trifolium cherleri</i> L.
<i>Crepis capillaris</i> (L.) Wallr.	<i>Trifolium gemellum</i> Pourret ex Willd
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	<i>Trifolium glomeratum</i> L.
<i>Dactylis glomerata</i> L.	<i>Trifolium hirtum</i> All.
<i>Diplotaxis virgata</i> (Cav.) DC.	<i>Trifolium striatum</i> L.
<i>Echium vulgare</i> L.	<i>Trifolium tomentosum</i> L.
<i>Eryngium campestre</i> L.	<i>Trisetum paniceum</i> (Lam.) Pers.
<i>Filago lutescens</i> Jordan	<i>Vulpia myuros</i> (L.) C.C. Gmelin
<i>Filago pyramidata</i> L.	

La compuesta mejor representada es *Anacyclus clavatus* acompañada de *Andryala integrifolia* y *Carduus tenuiflorus* en los vertederos arcósicos y, además, de *Centaurea melitensis*, *Chondrilla juncea*, *Mantisalca salmantica* y *Silybum marianum* en los calizomargosos. Por último, *Hirschfeldia incana* y *Spergularia rubra*, son la crucífera y cariofilácea, respectivamente, mejor representadas en todos los grupos de VRSU.

Tabla 17. Especies más frecuentes que crecen en VRSU sobre sustratos calizo-margosos.

SUBSTRATOS CALIZO-MARGOSOS	
<i>Aegilops geniculata</i> Roth	<i>Hordeum murinum</i> L.
<i>Aegilops triuncialis</i> L.	<i>Lactuca serriola</i> L.
<i>Anacyclus clavatus</i> (Desf.) Pers.	<i>Lolium rigidum</i> Gaudin
<i>Astragalus hamosus</i> L.	<i>Lophocloa cristata</i> (L.) Hyl
<i>Avena barbata</i> Pott ex Link	<i>Malva neglecta</i> Wallr.
<i>Avena sterilis</i> L.	<i>Mantisalca salmantica</i> (L.) Briq et Cavillier
<i>Biscutella auriculata</i> L.	<i>Marrubium vulgare</i> L.
<i>Bromus diandrus</i> Roth	<i>Medicago minima</i> (L.) Bortal.
<i>Bromus madritensis</i> L.	<i>Medicago orbicularis</i> (L.) Bortal.
<i>Bromus rubens</i> L.	<i>Medicago sativa</i> L.
<i>Carduus tenuiflorus</i> Curtis	<i>Melilotus sulcata</i> Desf
<i>Centaurea melitensis</i> L.	<i>Ononis spinosa</i> L.
<i>Chondrilla juncea</i> L.	<i>Onopordum illyricum</i> L.
<i>Convolvulus arvensis</i> L.	<i>Papaver rhoeas</i> L.
<i>Coronilla scorpioides</i> (L.) Koch	<i>Reseda lutea</i> L.
<i>Crepis vesicaria</i> L.	<i>Salsola kali</i> L.
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	<i>Scorzonera laciniata</i> L.
<i>Dactylis glomerata</i> L.	<i>Silene nocturna</i> L.
<i>Diploaxis virgata</i> (Cav.) DC.	<i>Silene vulgaris</i> (Moench) Garcke
<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'Her	<i>Silybum marianum</i> (L.) Gaertner
<i>Eryngium campestre</i> L.	<i>Sisymbrium irio</i> L.
<i>Filago pyramidata</i> L.	<i>Sonchus oleraceus</i> L.
<i>Foeniculum vulgare</i> Miller	<i>Trigonella monspeliaca</i> L.
<i>Galium parisiense</i> L.	<i>Trigonella polycerata</i> L.
<i>Hirschfeldia incana</i> (L.) Lagréze - Fossat	<i>Trisetum paniceum</i> (Lam.) Pers.

Así como las especies que crecen en las cubiertas de sellado de los respectivos VRSU se corresponden con muchas de las herbáceas catalogadas en los ecosistemas de referencia, hay una mayor incidencia de especies ruderales y de medios antropizados.

Los detallados estudios ecoedáficos y la realización de numerosos inventarios fitoecológicos, hicieron propicio el estudio del comportamiento autoecológico de muchas de estas especies, para así tratar de que puedan ser utilizadas en la restauración de ecosistemas degradados tan dificultosos como los de la mayoría de los vertederos estudiados, que se corresponden con un clima semiárido continental y con sequías crecientes, irregularidad estacional y anual del reparto de las precipitaciones, y además con salinidad elevada, pobreza en fosfatos y contaminados por metales pesados.

De ahí que hayamos estudiado los perfiles ecológicos de especies que se nos aparecían como más idóneas a los fines que perseguimos, como es el caso de fijación del suelo de los taludes. Especies como *Hirschfeldia incana*, *Vulpia ciliata* y algunas especies de *Bromus* que crecen en los suelos con altos contenidos de Zn. Algunas de las cuales, además de tolerar la presencia de un contenido relativamente elevado de este metal pesado, podía acumularlo en parte aérea o raíz.

En un estudio anterior (Pastor *et al.*, 1993b), hemos expuesto algunos parámetros vegetales considerados también como muy importantes al respecto (como son: éxito en la germinación, tolerancia a heladas tempranas, producción de semilla, hábito de crecimiento que favorece la protección del suelo y facilidad para la dispersión de semillas).

Tabla 18. Especies más frecuentes que crecen en VRSU sobre el substrato yesífero.

SUBSTRATO YESÍFERO

<i>Ajuga chamaepitys</i> (L.) Schreber	<i>Iberis ciliata</i> All.
<i>Amaranthus albus</i> L.	<i>Iberis crenata</i> Lam.
<i>Anagallis arvensis</i> L.	<i>Leontodon taraxacifolium</i>
<i>Artemisia herba-alba</i> Asso	<i>Limonium echioides</i> (L.) Miller
<i>Asteriscus aquaticus</i> (L.) Less.	<i>Lolium rigidum</i> Gaudin
<i>Atriplex halimus</i>	<i>Lophocloa cristata</i> (L.) Hyl
<i>Atriplex rosea</i> L.	<i>Marrubium vulgare</i> L.
<i>Avenula bromoides</i> (Gouan) H. Schloz	<i>Medicago minima</i> (L.) Bartal.
<i>Brachypodium dichotomum</i> (L.) Beauv.	<i>Mercurialis tomentosa</i> L.
<i>Bromus hordeaceus</i> L.	<i>Ononis natrix</i> L.
<i>Bromus rubens</i> L.	<i>Onopordum illyricum</i> L.
<i>Bromus squarrosus</i> L.	<i>Papaver rhoeas</i> L.
<i>Bromus tectorum</i> L.	<i>Papaver somniferum</i> L.
<i>Centaurea melitensis</i> L.	<i>Pistorinia hispanica</i>
<i>Cleonia lusitanica</i> (L.) L.	<i>Plantago afra</i> L.
<i>Dactylis glomerata</i> L.	<i>Portulaca oleracea</i> L.
<i>Desmazeria rigida</i> (L.) Tutin & E.F. War.	<i>Reseda lutea</i> L.
<i>Echinaria capitata</i> (L.) Desf.	<i>Scabiosa sicula</i> L.
<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'Her	<i>Sedum album</i> L.
<i>Erysimum cheiri</i> (L.) Crantz	<i>Senecio gallicus</i> Chaix
<i>Filago pyramidata</i> L.	<i>Sisymbrium irium</i> L.
<i>Geranium molle</i> L.	<i>Sisymbrium polyceratium</i>
<i>Haplophyllum linifolium</i> (L.) G. Don fil.	<i>Spergularia rubra</i> (L.) J et C Presl.
<i>Helianthemum salicifolium</i> (L.) Miller	<i>Stoibrax dichotomum</i>
<i>Heliotropium europaeum</i> L.	<i>Trigonella polycerata</i> L.
<i>Herniaria fruticosa</i>	<i>Trisetum paniceum</i> (Lam.) Pers.
<i>Herniaria hirsuta</i> L.	<i>Vulpia ciliata</i> Dumort
<i>Hordeum hystrix</i> Roth	<i>Vulpia membranacea</i> (L.) Dumort
<i>Hordeum murinum</i> L.	<i>Vulpia unilateralis</i> (L.) Stace

Sin embargo, a la hora de proponer algunas plantas para la siembra sobre las cubiertas de sellado de los vertederos, no es posible recomendar solamente especies que crecen atendiendo únicamente a alguna de las características aludidas, ya que nos encontramos ante escenarios climático-edáficos de indudable complejidad. Así, no era posible en absoluto recomendar un número demasiado limitado de especies según la ubicación de los substratos estudiados, ya que las características de la cubierta de sellado interactúan con la descomposición de las basuras y con los lixiviados superficiales que se producen al llover, dando lugar a cambios importantes en las condiciones edáficas de las cubiertas de los vertederos.

En La Tabla 19 se muestra la heterogeneidad espacial de dos parámetros relevantes en dos vertederos, considerando zonas y subzonas de los mismos, que reflejan la heterogeneidad espacial que dificulta las actuaciones de revegetación en los mismos. Por ejemplo, ya se mostró en la Tabla 7, a menor escala de detalle, las diferencias de pH y de conductividad en distintas zonas de la cubierta edáfica de estos dos vertederos seleccionados para este estudio (uno sobre substrato arcósico y otro sobre substrato calizomargoso). En la mencionada Tabla podemos observar que frente a la homogeneidad del pH de la cubierta edáfica en el vertedero de Mejorada del Campo, destaca la enorme heterogeneidad del pH entre las diferentes zonas consideradas en el vertedero de Móstoles (de 2,5 a 7,2) y En la Tabla 19 se ve también la que existe dentro de las diferentes sub-

zonas de una misma zona (de 3,2 a 7,4). En este último vertedero, se alcanzan valores muy bajos, que imposibilitan la colonización de dichas áreas.

Tabla 19. Valores de pH en agua y conductividad en diferentes zonas y subzonas de la cubierta edáfica de un mismo vertedero después de 10 años de sellado, y sin haber sido sometido a ninguna otra intervención.

CUBIERTA EDÁFICA DEL VRSU DE MEJORADA DEL CAMPO				CUBIERTA EDÁFICA DEL VRSU DE MÓSTOLES			
		pH	Conductividad μS/cm			pH	Conductividad μS/cm
ZONA 1	Subzona 1.ª:	7,8	297	ZONA 1	Subzona 1.ª:	7,1	706
	Subzona 2.ª:	7,8	361		Subzona 2.ª:	7,1	484
	Subzona 3.ª:	7,9	460		Subzona 3.ª:	7,4	452
	Media:	7,8	373		Media:	7,2	547
ZONA 2	Subzona 1.ª:	7,6	395	ZONA 2	Subzona 1.ª:	7,3	450
	Subzona 2.ª:	7,7	553		Subzona 2.ª:	7,4	494
	Subzona 3.ª:	7,7	514		Subzona 3.ª:	4,2	669
	Media:	7,7	487		Media:	6,3	538
ZONA 3	Subzona 1.ª:	7,9	564	ZONA 3	Subzona 1.ª:	3,4	1.032
	Subzona 2.ª:	7,6	551		Subzona 2.ª:	3,2	1.882
	Subzona 3.ª:	7,6	810		Subzona 3.ª:	7,4	394
	Media:	7,7	642		Media:	4,6	1.103
ZONA 4	Subzona 1.ª:	7,9	282	ZONA 4	Subzona 1.ª:	2,1	2.810
	Subzona 2.ª:	7,7	364		Subzona 2.ª:	2,7	2.690
	Subzona 3.ª:	7,9	405		Subzona 3.ª:	2,6	2.620
	Media:	7,8	350		Media:	2,5	2.707

En lo referente a la conductividad, en el vertedero de Mejorada del Campo (La Rendija), existían diferencias, si bien no muy acusadas, entre las diferentes zonas y también dentro de las subzonas pertenecientes a una misma zona. Las diferencias en conductividad en el vertedero de Móstoles al igual que lo que sucedía con el pH, son muy acusadas tanto entre zonas, como dentro de la misma área. Así mismo, en la Tabla 8 se exponían también las variaciones que presentan los valores de los aniones en los suelos de tres de los vertederos arcósicos. Los valores elevados de ciertos aniones en algunas parcelas de suelo desnudo pueden ser la explicación de la falta de crecimiento en ellas de las especies vegetales, y no solo atribuirse este hecho a la escasez o casi inexistencia de un banco de semillas.

Lógicamente se deberán tener en cuenta también, las interacciones entre especies a la hora de hacer siembras de aquellas que puedan parecer más idóneas para crecer en las cubiertas edáficas de sellado, ya que la competencia con las especies que provienen del banco de semillas, puede ser un importante obstáculo para las labores de fitorrestauración.

Finalmente resumimos diciendo que, las plantas que crecieron, espontáneamente, en la cubierta de vertederos de residuos urbanos e industriales y que fueron sellados en casi su totalidad en la década de los ochenta y noventa en la Comunidad de Madrid, se correspondían por lo general y con toda lógica, con las especies inicialmente herbáceas de los ecosistemas del entorno, durante los primeros años después del sellado. Al existir no sólo menores cantidades de materia orgánica en la cubierta edáfica de los VSRS, sino

mayores concentraciones de metales pesados, así como una gran variabilidad de los niveles que presentan los diferentes parámetros edáficos en dicha cubierta, no se hacía fácil la tarea de la fitorrecuperación de las mismas. Ahora cada vez más los sistemas se han ruderalizado y ya van predominando mosaicos de las especies iniciales en retirada con un creciente aumento en volumen y diversidad de «malas hierbas».

Aspectos sintéticos comunes a los vertederos sellados

El sellado de los vertederos de residuos sólidos urbanos (VRSU) tenía inicialmente para nosotros, como objetivo principal preparar el área que ocupan para su restauración vegetal, ya que eran suelos desnudos y muy compactados por el paso de camiones. Desearíamos poder integrar el área de vertido en el medio que le rodeaba, y sin deterioro de las condiciones medioambientales del lugar. Sin embargo, la mayor parte de los vertederos aún tiene una deficiente integración con el entorno donde se ubican. Los proyectos de investigación están limitados en el tiempo y la administración autonómica de aquel momento, que financió el estudio inicial, luego no utilizó las conclusiones obtenidas, ni las propuestas realizadas, ni tampoco llevó a cabo alguna iniciativa de interés, ni las trasladó a las administraciones municipales. Lo único que hicieron algunos ayuntamientos plantar pinos sobre pedregales de antiguas graveras, utilizadas en el sellado o sobre unos pocos centímetros de suelo sobre toneladas de basuras compactadas; o lo que es peor, cargarse un retamar que crecía maravillosamente desde los primeros momentos, porque el suelo de cubrición era asimismo de reatar, para plantar semillas comerciales exigentes en agua, y por tanto inadecuadas que languidecían y se secaban en aquel suelo.

Por lo tanto podemos decir, que aún hoy día los vertederos presentan, en general, un **importante impacto visual negativo**, tanto **por su visibilidad** desde las carreteras, como **por su morfología** (taludes con pendientes muy acusadas; en sus primeros años casi desprovistos de vegetación, que aún es escasa en muchas áreas de los mismos en la actualidad). Todos estos vertederos que venimos estudiando a lo largo de más de 20 años, contienen residuos urbanos e industriales, además de presentar fuertes pendientes, que han hecho dificultosa su «colonización natural» (Fernández-Serrano *et al.*, 1992). Pero sin duda, el mayor impacto producido está vinculado a la contaminación por el efecto de los lixiviados (Stegman 1982, Cyr *et al.*, 1987, Antigüedad *et al.*, 1991; Adarve *et al.*, 1998b), que afectan especialmente a sus áreas de descarga y a los ecosistemas del entorno (Pastor *et al.*, 1993a, Urcelai *et al.*, 1994; Hernández *et al.*, 1998a). No obstante, estos vertederos siempre han tenido un gran interés para la aplicación de la ciencia ecológica, ya que proporcionan un escenario real adecuado para la investigación acerca de las pautas que se pueden seguir tanto para la restauración de ecosistemas degradados y contaminados (Lal *et al.*, 1989, Bradshaw 1992), como para el conocimiento de especies vegetales autóctonas indicadoras de contaminación (Wang 1992) y otras idóneas para la fitorremediación y fitorrestauración de los suelos degradados y contaminados.

De la misma manera, se han tenido en cuenta estas características en los ecosistemas del entorno no afectados, considerados en el estudio como referentes en orden a las comunidades vegetales, según se expone en Pastor *et al.* (1993a). La cubierta vegetal que creció espontáneamente en los VRSU estudiados durante la primera década de su clausura, se vio determinada por la existencia en el suelo de cubrición de un banco de semillas y en el entorno de cada uno de ellos, de propágulos de diferentes especies.

Los valores de la mayoría de las variables edáficas analizadas son, en general, más elevados en los VRSU que en los suelos de los ecosistemas de referencia estudiados y situados en el entorno, (con el inconveniente de presentar cantidades apreciables de metales pesados: Zn, Cu, Pb y Ni, y cantidades más bajas de materia orgánica y N total.

Los contenidos de Na y B son también claramente más elevados en la cubierta edáfica de los vertederos que en los ecosistemas de referencia situados en el entorno.

La evaluación realizada en la actualidad nos lleva a concluir que las incidencias y/o usos sufridos continuamente después del primer sellado, así como las características particulares de cada uno de los vertederos presentan características particulares que dificultan la aplicación de un determinado tipo de protocolo de diagnóstico. Así, en los vertederos sellados con suelos de sus respectivos entornos se mezclan los dos procesos de sucesión ecológica: por un parte, puede tratarse de una sucesión primaria, debido a que comienza una nueva comunidad en estos sistemas «recién surgidos», y por otra parte, se puede establecer una sucesión secundaria favorecida por la germinación del banco de semillas que lleva el suelo de sellado. En todo caso, dos cuestiones de importancia hay que subrayar: se necesita detener la erosión con los efectos de colmatación de cauces, eutrofización y contaminación de aguas superficiales; y en segundo término, no seguir utilizando un vertedero sellado con constantes usos y sin vigilancia adecuada de los vertidos y otros depósitos en los mismos que dificulta cualquier alternativa de restauración.

Agradecimientos: Al Programa EIADES financiado por la Comunidad de Madrid y al Proyecto CTM 2008-04827/TECNO financiado por el M.^o de Ciencia e Innovación.

Referencias bibliográficas

- ADARVE, M.^a J. y REBOLLO, L. F. (1993). «Incidencia ambiental de un vertedero sellado de residuos sólidos localizado en Móstoles (Madrid) sobre la composición natural de las aguas subterráneas». *Geogaceta*, 13: 3-6.
- ADARVE, M.^a J.; HERNÁNDEZ, A. J., y REBOLLO, L. F. (1994a). «La contaminación de las aguas subterráneas por lixiviados de un vertedero sellado de residuos sólidos urbanos localizado en Torrejón de Ardoz (Madrid)». *Agua y Medio Ambiente*, 162-170. Ed. TIASA, Madrid.
- ADARVE, M.^a J.; HERNÁNDEZ, A. J.; PASTOR, J., y OLIVER, S. (1994b). «Contribución de los vertederos de residuos sólidos urbanos a la salinización y nitrificación del suelo sobre sustratos básicos». En *Suelos Contaminados*, II: 21-24. Ed. Eusko Jaurlaritza, IHOBE, Vitoria-Gasteiz.
- ADARVE, M.^a J.; HERNÁNDEZ, A. J.; GIL, A., y PASTOR, J. (1998). «B, Zn, Fe and Mn content in four grassland species exposed to landfill leachates». *J. Environmental Quality*, 27: 1286-1293.
- ANTIGÜEDAD, I.; LUENGO, C.; ZUBIAGA, R.; GRANADO, J. M., y BONILLA, A. (1991). «Lixiviación en vertederos de residuos urbanos en la Comunidad Vasca». *Tecnoambiente*, 10: 39-47.
- BRADSHAW, A. D. (1992). «Pollution and Ecosystem». En *The Treatment and Handling of Wastes* (Bradshaw, A. D. et al., eds.). London: Chapman and Hall, pp. 7-55.
- CYR, F.; MEHR, M. C., y MALLETT, V. N. (1987). «Leaching of chemical contaminants from municipal landfill sites». *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 38: 775-782.
- FERNÁNDEZ-SERRANO, M. E.; HERRÁEZ, I.; CARRERAS, N., y QUEJIDO, A. (1992). «Environmental degradation caused by municipal solid wastes disposal in Collado Villalba landfill». *Proceedings 6th International Solid Wastes Congress and Exhibition 1*.
- HERNÁNDEZ, A. J., y PASTOR J. (1989). «Técnicas analíticas para el estudio de las interacciones suelo planta». *Henares, Revista Geología*, 3: 67-102.

- HERNÁNDEZ, A. J.; ADARVE, M. J., y PASTOR, J. (1998a). «Some impacts of urban waste landfills on mediterranean soils». *Land Degradation & Development*, 9: 21-33.
- HERNÁNDEZ, A. J.; ADARVE, M. J.; GIL, A., y PASTOR, J. (1998b). «Soil salination from landfill leachates: effects on the macronutrient content and plant growth of four grassland species». *Chemosphere*, 38: 1693-1711.
- LAL, R.; HALL, G. F., y MILLER, F. P. (1989). «Soil degradation: I. Basic processes». *Land Degradation and Rehabilitation*, 1: 51-69.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN (MAPA) (1982). *Métodos Oficiales de Análisis de Suelos y Aguas*.
- PASTOR, J.; URCELAY, A.; OLIVER, S., y HERNÁNDEZ, A. J. (1993a). «Impact of Municipal Waste on Mediterranean Dry Enviroments». *Geomicrobiology Journal*, 11: 247-260.
- PASTOR, J.; URCELAY, A.; HERNÁNDEZ, A. J., y GARCÍA, A. (1993b). «Investigations on the revegetation problems of landfill soils in semiarid environment». En *Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection*. (EJLSACHERS, H. J. P. & HAMERS, T., eds.), Dordrecht. Kluwer Academic Publishers, pp. 323-326.
- PASTOR, J., y HERNÁNDEZ, A. J. (2002). «Estudio de suelos de vertederos sellados y de sus especies vegetales espontáneas para la fitorrestauración de suelos degradados y contaminados del centro de España». *Anales de Biología*, 24: 159-167.
- PASTOR, J., y HERNÁNDEZ, A. J. (2002). «Estudio de suelos de vertederos sellados y de sus especies vegetales espontáneas para la fitorrestauración de suelos degradados y contaminados del centro de España». *Anales de Biología*, 24 : 159-167.
- STEGMAN, R. (1982). *The pollution potential of sanitary landfill. Effects of waste disposal on groundwater and surface water*. INMS Publications, 139: 125-135.
- URCELAI, A., PASTOR, J., y HERNÁNDEZ, A. J. (1994). «Los contaminantes inorgánicos de suelos de vertederos de RSU en relación a los organismos vivos». En *II Congreso Internacional de Suelos Contaminados*, Vitoria-Gasteiz, pp. 17-20.
- WANG, F. (1992). «Use of plants for the assessment of environmental contaminants». *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 126: 87-127.

Estudio multidisciplinar de vertederos sellados

Caracterización y pautas de recuperación

Editoras:

Ana Jesús Hernández

Carmen Bartolomé



Universidad
de Alcalá

SERVICIO DE PUBLICACIONES



R. 20.452

El contenido de este libro no podrá ser reproducido,
ni total ni parcialmente, sin el previo permiso escrito del editor.
Todos los derechos reservados.

© Universidad de Alcalá, 2010
Servicio de Publicaciones
Plaza de San Diego, s/n
28801 Alcalá de Henares
www.uah.es

I.S.B.N.: 978-84-8138-865-7
Depósito Legal: M-11864-2010

Diseño de cubierta: Gráficas 85, S. A.
Composición: Gráficas 85, S. A.
Impresión y encuadernación: Gráficas 85, S. A.
Impreso en España